

VISSY KÁROLY

# Az időjárás előrejelzése: jóslás vagy tudomány?



Vissy Károly  
meteorológus

Az időjárás a mindennapi életünket befolyásoló környezet szerves része, jövőbeni alakulásának ismerete, azaz előrejelzése az ember évezredes vágya. Az időjárás-előrejelzés igazi tudománnyá azonban csak az elmúlt százötven évben vált. Az előadás felvillantja e fejlődés mérföldköveit, amelyek mind kapcsolódnak a tudomány és a technika, különösképp a mérés technika, a távközlés, a távérzékelés, az űrkutatás és döntően a számítástechnika másfél százados eredményeihez. Ennek a kis történeti áttekintésnek az a célja, hogy megismertessük önöket az alapvető légköri folyamatokkal, hogy jobban megértsék a mindennapi időjárást és a médiában nap mint nap közzétett időjárás-jelentéseket.

1935-ben született. 1957-ben végzett az ELTE Természettudományi Karának meteorológus szakán.

Pályáját az Országos Meteorológiai Szolgálatnál kezdte; foglalkozott repülésmeteorológiával, rövid távú előrejelzéssel. 1985–1993 között a Központi Előrejelző Intézet igazgatóhelyettese, majd igazgatója; jelenleg az elnök szakmai főtanácsadója.

1968-tól a Magyar Rádió, 1972-től a Magyar Televízió külső munkatársa. 1971–1972-ben részt vett a 17. szovjet Antarktisz-expedícióban mint a Vize Professor nevű tudományos kutatóhajó vezető szinoptikusa. 1973–1999 között a Meteorológiai Világszervezet Repülésmeteorológiai, illetve Alaprendszerek Bizottságában Magyarország hivatalos képviselője.

Főbb kutatási területei: az időjárás előrejelzése és módszereinek fejlesztése, a közforgalmon kívüli polgári repülés meteorológiai kiszolgálásának megszervezése, a meteorológiai szolgáltatások gazdasági hasznosítása és a magyar média-meteorológia megalapozása.

## Az időjárás-előrejelzés kezdete

A **meteorológia**, a légkör tudománya több szempont szerint tagolható. Az egyik felosztás szerint a légkörben lejátszódó folyamatok vizsgálata két nagy csoportba sorolható: éghajlat és időjárás. E két fogalom korrekt, pontos meghatározását már sokan kísérelték meg, váltakozó sikerrel. Én is csak egy



Zeusz villámokat szór  
az Olümposzról. Giulio Romano  
freskójának részlete, 16. sz.

### Meteorológia:

görög eredetű szó, jelentése:  
légkörten.

### Societas Meteorologica Palatina:

1780-ban, Mannheimben alakult társaság, az akkor már Európában és az észak-atlanti térségben működő meteorológiai megfigyelő állomások adatainak összegyűjtésére és tudományos feldolgozására. Ezt az időpontot tekinthetjük az újkori meteorológia kezdetének.



Az időjárási megfigyelések kézikönyvének címlapja, 1789

leegyszerűsített megközelítést teszek, a teljesség legcsekélyebb igénye nélkül. Eszerint:

) az *éghajlat* a légkör állapotának és folyamatainak – a múltban mért és megfigyelt meteorológiai adatok feldolgozása alapján meghatározott, a Föld egy adott térségére vonatkozó – általános jellemzője;

) az *időjárás* a légköri állapotjelzőknek és a légköri folyamatoknak egy meghatározott időpontra vonatkozó (pillanatnyi) állapota.

Az éghajlat vizsgálatának, kutatásának és alkalmazásának területe a klimatológia, az időjárás elemzésének – ezen belül rövid és középtávú előrejelzésének – tudománya pedig a szinoptika. Mivel előadásom tárgya az időjárás előrejelzése, a továbbiakban a szinoptika alapjaival, fejlődésével, jelenével és (a csak sejthető) jövőjével foglalkozom.

## Az első lépések

Az emberiség vágya és törekvése a természet – s ezen belül az időjárás – folyamatainak megismerésére évezredekre nyúlik vissza, hiszen az ember mindennapjai, munkája, gyakran szórakozása, olykor vagyoni biztonsága, sőt akár az élete is szorosan függ az időjárástól. A meteorológia fogalmát már az ókori görög kultúra virágzásának időszakában is ismerték. Ebben a kezdeti szakaszban azonban – épp a tudományos ismeretek hiányában – a tapasztalt és leírt meteorológiai események magyarázatát főként misztikus, földön kívüli hatásokban keresték (szellemek befolyása, istenek öröme vagy haragja, csillagok állása).

A bennünket körülvevő légkör fizikai tulajdonságait megjelenítő fizikai paramétereket (légnomás, hőmérséklet, nedvesség stb.) csak az elmúlt évezred közepe táján ismerte meg a tudomány. Ezt követte a légköri jellemzők mérésére szolgáló első eszközök, műszerek kifejlesztése (hőmérő, barométer, napfénytartam-mérő stb.)

Az újkori meteorológia kezdetének 1780-at tekinthetjük. Ekkor kezdődött el a **Societas Meteorologica Palatina** szervezésében az akkoriban – főként Európában és Észak-Amerika keleti partjain már rendszeresen működő – körülbelül 40–45 meteorológiai állomás adatainak összegyűjtése és tudományos értékelése.

Mivel a tudomány ebben az időben még nagyon keveset tudott a légkör fizikai törvényeiről, az ismeretek közvetlen hasznosításában nem is nagyon reménykedhettek. Annál inkább serkentette a kor tudósait a természet megismerésének vágya, a tudományos kíváncsiság. A tudósok a mért és összegyűjtött adatokat térképekre rajzolták, elemezték. Rájöttek, hogy ha az állomások műszereivel megmért légköri paraméterek (például hőmérséklet, nedvesség stb.) egyenlő értékeit vonalakkal összekötik, érdekes összefüggések tárulnak fel előttük. Ez a munka a 19. század első felében egy sor légkörfizikai törvényszerűség felfedezéséhez vezetett, amelyek elsősorban a már rendszeresen mért meteorológiai paraméterek között meglévő kapcsolatokat, összefüggéseket tették egyre átláthatóbbá.

## A balaklavai fordulat

Az újkori meteorológia tehát alig több mint kétszáz éves. A fejlődés a meteorológiában a 19. század közepén gyorsult fel, és – mint oly gyakran a tudományok történetében – ebben kiemelkedő szerepet játszottak a hadviselés igényei, a katonai célok. Történelmi tény, hogy a krími háború során, 1854. november 14-ére virradó éjszaka a Krím-félsziget mellett a Balaklavai-öbölben néhány óra alatt súlyos károkat szenvedett az egyesült angol–francia–török hadiflotta.



*A balaklavai vihar, R. Carrick festménye*



*Le Verrier, Urbain (1811–1877)*

Elsüllyedt vagy megrongálódott több mint harminc hadihajó, elpusztult több száz tengerész. A csapást azonban nem a cári hadiflotta mérte az angol–francia hajóhadra, hanem egy hirtelen érkezett, pusztító vihar. A nagy emberáldozattal és anyagi veszteséggel járó katasztrófát követően bízta meg a francia kormány Urbain Le Verrier csillagászt, a Párizsi Csillagászati Observatórium igazgatóját a következő feladattal: vizsgálja meg, hogy a már említett meteorológiai állomások adatainak előzetes ismeretében számíthattak volna-e a vihar közeledtére.

A vizsgálat igazolta, hogy a katasztrófát megelőző napok megfigyelési adatainak térképre vitelével és elemzésével felismerhető és a Földközi-tenger közepétől nyomon követhető volt az a ciklon, amelyhez a szóban forgó vihar kapcsolódott. Ez a felismerés teremtette meg a meteorológián belül az új szakmai ágat, az időjárás-előrejelzés tudományának, vagyis a **szinoptikának** az alapjait. Megszülettek tehát az első szinoptikus térképek. Ezek elemzése tette lehetővé a légkör fizikai állapotának és a benne lejátszódó mozgásoknak, az áramlások fizikai törvényeinek fokozatos megismerését.

### Szinoptika:

görög eredetű szó, az időjárás elemzésének és előrejelzésének tudománya; a szinopszis szó jelentése nagy mennyiségű adat egyidejű áttekintésére és az ebből levont következtetésekre utal.



# Légkörfizikai ismeretek a szinoptika születésekor

## A levegő hőmérsékletének és nedvességtartalmának összefüggése

### Harmatpont:

az a hőmérséklet, amelyre a levegőt lehűtve a benne lévő vízgőz telítődik, és belőle a víz kicsapódik (köd vagy felhő keletkezik).

### Függőleges hőmérsékleti gradiens:

a légkörben felfelé haladva a hőmérséklet csökkenésének mértéke. Dimenziója:  $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ .

### Izobár:

az egyenlő légnyomású pontokat összekötő görbék a szinoptikus térképeken. Jelentős szerepük van a légkör áramlási rendszereinek szemléltetésében (képi megjelenítésben).

Fizikai tény, hogy a levegőben lévő vízgőz telítettsége függ a hőmérséklettől. Minél hidegebb a levegő, annál kevesebb tényleges nedvességtartalomra van szükség ahhoz, hogy a levegőben lévő víz kicsapódjon, köd, felhő vagy csapadék keletkezzen. Ezért ha adott nedvességtartalmú levegő bármilyen oknál fogva lehűl, elérheti azt a hőmérsékletet, amelyen a kicsapódás megtörténik. Ezt a hőmérsékletet nevezték el a meteorológusok – szerintem költői kifejezéssel – **harmatpont**nak, a tényleges hőmérséklet és a harmatpont viszonyát jellemző mérőszámot – százalékban kifejezve – pedig *relatív nedvességnek*. Az időjárás jellegét – tehát azt, hogy süt a nap, felhős vagy ködös az idő, vagy éppen csapadék hullik – a levegő víztartalma és hőmérséklete együtt határozza meg. Ez a tény teszi fontossá az *áramlások* szerepét az időjárás elemzésénél, ugyanis adott nedvességtartalmú levegő az áramlások segítségével kerül leggyakrabban hidegebb környezetbe és hűl le ezzel a harmatpontjáig, azaz a benne lévő víz kicsapódásáig. Természetesen a folyamat fordítva is igaz, a relatíve nedves levegő melegebb környezetbe kerülve kiszáradhat.

Az is légkörfizikai tény, hogy a hőmérséklet a légkörben felfelé haladva – azaz a magassággal – jelentősen csökken. Egyensúlyban van a légkör, azaz nem jönnek létre benne függőleges légmozgások, ha a hőmérséklet-csökkenés mértéke, vagyis a légkör **függőleges hőmérsékleti gradiense** – százméterenként – nedves levegőben  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , száraz levegőben  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ha a hőmérséklet-csökkenés a magassággal ennél nagyobb mértékű, *labilis* lesz a légállapot, és nedvesítő hatású feláramlások alakulnak ki. Ha felfelé haladva kisebb mértékű a hőmérséklet-csökkenés, intenzív feláramlások nem alakulhatnak ki, ilyenkor beszélünk *stabilis* légállapotról. Ha egy földrajzi hely fölött a lehűlés a magasban következik be – vagy ott erősebb, mint alul –, az labilizálja a légállapotot, és ez természetesen fordítva is igaz.

A függőleges áramlásoknak tehát kitüntetett szerepe van az időjárás jellegének kialakításában, ugyanis a feláramlások a földközeli melegebb levegőt hidegebb környezetbe emelve segítik a kicsapódást, a felhő- és csapadékképződést. A leáramlások fentről a melegebb alsó légrétegekbe juttatják a légrézecskeket, azaz stabilizáló, tehát szárító, felhőoszlató hatásúak.

## A feláramlás, illetve a csapadékos időjárás leggyakoribb okai a természetben

A feláramlások kialakulásának sokféle fizikai oka lehet. Talán a leggyakoribb ok, amikor az alsó légrétegekben, tehát a fölfelszín közelében két eltérő irányú áramlás összetart, és *konvergencia* alakul ki. Ilyenkor a két áramlat



érintkezési vonalának környezetében a levegő szükségszerűen torlódik, és „szökni” csak felfelé tud, azaz létrejön a feláramlás. Ennek fordítottja is gyakori a természetben, amikor két áramlás szét tart, vagyis *divergencia* jön létre. A divergencia vonalának környezetében az alsó légrétegekben levegőhiány lép fel, ami csak felülről pótlódhat, ezért a „szétáramlás” térségében szárító hatású, leszálló légmozgások alakulnak ki.

Egy másik gyakori feláramlási ok az ún. *orografikus emelés*, vagyis amikor egy akadályként álló hegyvonulat kényszeríti feláramlásra a levegőt. Ilyenkor a hegység áramlás felőli oldalán alakul ki a felhős, csapadékos idő. A túloldalon, ahol az áramlás már lefelé tart, feloszlanak a felhők, napos, száraz az idő. Ezt nevezi a szaknyelv főnjelenségnek.

Főként nyáron, a napos reggelrel induló nappalok során alakul ki a feláramlások harmadik jellegzetes formája, a termikus emelés, és következménye, a *konvekció*. A napsugárzás hatására minőségétől, formájától függően a földfelszín egyenetlenül melegszik fel. A melegebb helyek fölött a gyorsan felmelegedő levegő alakítja ki a feláramlást. Ha a feláramlás sebessége szelídebb, szelíd nyári gomolyfelhők, ha erőteljesebb, délutánra nyári záporok, zivatarok is kialakulhatnak.



Felhőtanulmány. J. Constable festménye, részlet, 1821

## A Föld légkörének áramlási rendszerei

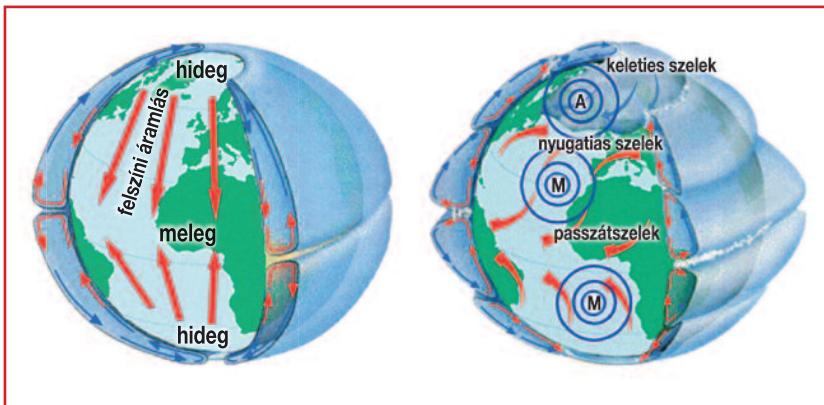
Visszatérve az időjárás térképi ábrázolásának első kísérleteihez, a korszak legnagyobb felfedezése az egyenlő nagyságú légnyomási értékek összekötése, az **izobárvonalak** térképre rajzolása volt. A meteorológusok előtt feltárták a légkör áramlásának törvényszerűségei, felfedezték a légnyomási képződményeket, megalkották a ciklon és az anticiklon fogalmát.

A Földünket körülölelő levegő mozgásának két alapvető forrása van:

- › az első az egyenlítői övezet és a két sarkvidék közötti hőmérséklet-különbség. Az Egyenlítő vidékén a földfelszín közelében gyorsan melegedő levegő a magasba emelkedik, és a sarkoktól az alsó légrétegekben hideg levegő áramlik a helyére. A magasban fordított irányú a mozgás, azaz kialakul az Egyenlítő és a sarkvidékek között egy, az Egyenlítőnél emelkedő, a sarkoknál leszálló cirkuláció. Pontosabban kialakulna, ha a Föld nem forogna;
- › a Föld forgása következtében erre a cirkulációra egy másik erő, az eltérítő (**Coriolis**) erő hat, amely ezt a cirkulációt alaposan összekuszálja. Ör-

### Coriolis-erő:

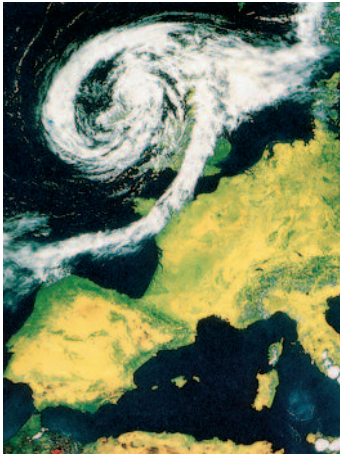
a forgó vonatkozási rendszerekben (pl. a Föld légköre) mozgó részecskékre ható *tehetetlenségi* (az eredeti mozgási iránytól *eltérítő*) erő.



Ha a Föld nem forogna (balra)  
A Föld légkörzési rendszere (jobbra)

vényeket alakít ki, azaz létrehozza a légkör áramlási rendszereit; vagyis a légnyomási képződményeket – köztük a legjellegzetesebbeket – az időjárás legfontosabb hordozóit: a ciklonokat és az anticiklonokat. A végleges áramlási kép kialakulásában fontos szerepe van még a súrlódási erőnek is.

## A ciklon



*Kifejlett ciklon felhőzete*

A ciklon olyan légörvény, amelyben a légnyomás a középpontban a legalacsonyabb, és amelyben a levegő az északi féltekén az óramutató mozgásával ellentétes irányban, nagyon enyhén befelé mutató spirális mozgással forog, azaz a szél a ciklon középpontja körül, de kissé a középpont felé közelítve fúj. Emiatt a ciklon belsejében a levegő összeáramlása, torlódása alakul ki, s innen a levegő csak felfelé tud továbbáramlani. A ciklon belsejében tehát felhő- és csapadékgerjesztő feláramlások jönnek létre, ezért a ciklon általában a felhősebb, csapadékosabb időjárás hordozója, és a markáns időjárási események, változások is általában a ciklonokhoz kapcsolódnak.

Minél erőteljesebben növekszik a légnyomás a ciklon középpontjától kifelé haladva, azaz minél nagyobb a légnyomási gradiens a ciklonban, annál nagyobb az áramlás sebessége, annál erősebb a szél. A ciklon tehát rendkívül összetett képződmény, viselkedése a felsorolt néhány tényezőn kívül függ még a benne lévő hőmérséklet vízszintes és függőleges eloszlásától, a ciklon földrajzi helyzetétől, az alatta fekvő felszín minőségétől és még sok minden mástól. A néhány száz kilométer átmérőjű trópusi ciklon, a hurrikán (vagy ahogy a Távol-Keleten hívják: tájfun) is a ciklonok családjába tartozik, de ideszámítanak az esetenként akár 2–2,5 ezer kilométer átmérőjű, sokkal szelídebb, de bonyolultabb szerkezetű, mérsékelt-övi ciklonok is.

*Hurrikán a Karib-tenger térségében*



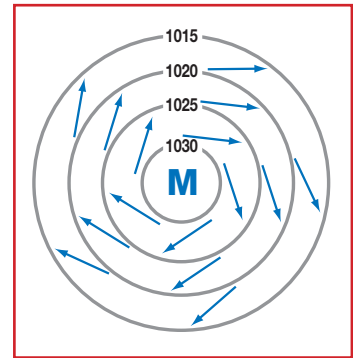


## Az anticiklon

Az anticiklon olyan légörvény, amelyben a légnyomás a középpontban a legmagasabb, és amelyben a levegő az északi féltekén az óramutató mozgásával megegyező irányban, nagyon enyhén kifelé mutató spirál mentén mozog, azaz a szél a ciklon középpontja körül, de kissé a középponttól távolodva fúj. Az anticiklon belsejében ezért a kifelé távozó levegő helyére a magasból érkezik az utánpótlás, azaz az anticiklon belsejében szárító, ezért felhőoszlató hatású leszálló légmozgások alakulnak ki. Az anticiklon jellemzője ezért általában a szárazabb, naposabb, de télen gyakran a tartósan ködös idő.

A szél erősség és a légnyomási gradiens összefüggése itt is fennáll, de az anticiklonban ritkább az erős gradiens. Az anticiklon maximális mérete a több ezer kilométert is elérheti.

A ciklont, illetve az anticiklont a légnyomási képződmények két szélső megjelenési formájának tekinthetjük. A kettő között – sőt bármelyiken belül – a légnyomás vízszintes eloszlásának számos változata előfordulhat, s ezek aszerint alakítják az időjárást, hogy bennük a levegő össze- vagy szét-, azaz fel- vagy leáramlik.



*Az anticiklon áramlási rendszere*

## A szinoptika hőskora

### Az időjárás előrejelzésének „szakértői módszere”

Az időben egymás után következő időjárási (szinoptikus) térképek vizsgálatával a meteorológusok már nyomon tudták követni a légkörben lejátszódó változásokat, vagyis az időjárási folyamatok, a ciklonok, az anticiklonok földrajzi áthelyeződését (mozgását). Innen már csak egy lépés volt,

*Légnyomás-térkép 1893-ból  
(balra)*

*Hőmérséklet-eloszlás térkép  
1893-ból (jobbra)*





### Szakértői módszer:

a közelmúlt időjárási folyamatnak extrapolálásán alapuló, azt a szakember fizikai okoskodásával, tapasztalati tudásával kiegészített időjárás-előrejelző módszer.

### Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ):

az OMSZ magyar jogelődjét 1870-ben alapították *Magyar Királyi Meteorológiai és Földdelejtességi Intézet* néven. Az alapító okirat, a király, Ferenc József saját kezű széljegyzetével és aláírásával az OMSZ-ben található.

### IMO (International Meteorological Organisation):

feladata a meteorológiai tevékenységnek – mind operatív, mind pedig tudományos szempontból – nemzetközi szinten történő összehangolása volt.

hogy a térképek sorozatából megismert folyamatot, azaz az időjárás közelmúltját az ezzel foglalkozó szakember gondolatilag továbbvigye, vagyis a már bekövetkezett időjárási folyamatokat extrapolálja, és ebből – fizikai okoskodásokkal kiegészítve – következtetéseket vonjon le a jövőre nézve. Ezzel a meteorológia elérkezett az időjárás-előrejelzés első használható módszeréhez, amelyet a meteorológia tudománya később **szakértői módszernek** nevezett el.

Ahhoz, hogy ezek az ismeretek a mindennapi életben, vagyis a gyakorlatban is használhatók legyenek, sok más is kellett. Meg kellett teremteni azokat a technikai és szervezeti feltételeket, amelyek lehetővé tették, hogy az említett, már működő meteorológiai állomások adatai nagyon rövid idő alatt olyan helyekre kerüljenek, ahol mód van a feldolgozásukra, elemzésükre és ennek eredményeként következtetések levonására, az előrejelzés elkészítésére.

Le Verrier vizsgálatainak eredményét, nevezetesen azt, hogy van remény az időjárás alakulásának, ezen belül a tengeri viharoknak az előrejelzésére, a tengeri hatalmak kormányai ismerték fel elsőként. Bár néhány országban már ez előtt is működtek főként éghajlati mérésekkel és kutatásokkal foglalkozó szervezetek, intézetek, ezt követően sorra alakultak meg az egyes országok tengeri időjárás-veszélyjelző szolgálatai (Franciaország, Anglia, Hollandia, Osztrák–Magyar Monarchia, Oroszország stb.). Ezek biztosították a kezdeti előrejelző munka szervezeti feltételét.

## A szikratávíró

Le Verrier ötlete volt, hogy a megfigyelési adatok gyors célba juttatása érdekében használják fel az akkoriban rohamosan terjedő szikratávírókat. A célpontok pedig, ahová az adatoknak meg kellett érkezniük, az egymás után megalakuló meteorológiai intézetek voltak. Nemzetközi egyezmények születtek a megfigyelések szabványosítására, az időjárási táviratok kódolására, a nemzetközi adatcsere rendjére vonatkozóan. A nemzetközi együttműködés világméretű szervezettségének kialakulásában fontos állomás volt 1905, amikor is megalakult a meteorológiai tevékenységet nemzetközi szinten koordináló első szervezet, az **IMO**.

## A meteorológiai kód: a meteorológusok „eszperantója”

Itt egy kis kitérőt kell tennünk, hogy megemlítsük azt az „előrelátást”, amelyről szakmai elődeink – ha ösztönösen is, de – tanúságot tettek. A kutatók már a kezdet kezdetén megszervezték a rendszeres, nemzetközi, eleinte tisztán a kölcsönösségen alapuló meteorológiai adat- és információcserét. A megfigyelés helyét, időpontját, a mért adatokat és a megfigyelt jelenségeket rendezett, logikusan felépített számokkal helyettesítették, a számokat öt számjegyű csoportokba rendezték, és ezeket a számkódokat cserélték ki a távíró segítségével. A számkódokat eleinte (a 19. század közepén) csak a



földfelszíni megfigyelésekhez dolgozták ki, de később számos meteorológiai információhoz is kifejlesztették. A rendszer előnyei: a közlendőket rendkívül könnyen és bármely nyelven egyértelművé és kezelhetővé tette; apró módosításokkal a 20. század közepén a meteorológiába berobbanó számítástechnika input adatforrásául szolgált.

## Az időjárás-előrejelzés a 20. században, a számítógépek megjelenése előtt

### A repülés és a meteorológia kapcsolata

A repülés elterjedése a 20. század elején mérőföldkönek számít a meteorológia fejlődésében. A meteorológusok számára ugyanis a repüléssel nemcsak szolgáltatásaiknak egy új hasznosítási területe jelent meg, hanem a légkör megismerésének merőben új lehetősége is. Korábban a földfelszínre telepített megfigyelőállomások adatainak elemzése alapján a szakemberek csupán kétdimenziós képet kaptak a légkörről. A magasabb légkör fizikai állapotára, folyamataira legfeljebb következtetni tudtak (a felhők mozgásának, fejlődésének, változásainak megfigyeléséből vagy a szabadlégkör állapotára kevésbé jellemző heggyi állomások adataiból). A repülőgép azonban a magasba emelte mind a meteorológusokat, mind a mérőműszereiket, új dimenziót, pontosabban a légkör harmadik dimenzióját nyitva meg előttük. Nyugodtan állíthatjuk, a meteorológia és a repülés a mai napig kölcsönhatásban van: a biztonságos repülés elképzelhetetlen a meteorológia nélkül, de a meteorológia fejlődése is sokat veszített és lassúbb lett volna a repülés által nyújtott ismeretek hiányában.

### Az időjárási front

Az 1920-as évek szakmai szempontból minőségi változást hoztak az időjárás-előrejelzések fejlődésébe. A prognózisok alapvető eszköze továbbra is a légnyomás-szinoptika maradt, de a meteorológusok eszköztára kiegészült egy új fogalommal, az időjárási front fogalmával.

Ebben az időben új szinoptikai iskola jött létre Norvégiában, kiváló szakembergárdával, a Bjerknes „dinasztia” (apa és fia, Vilhelm és Jacob) irányításával. Ők fedezték fel térképeiken az időjárás-változások legfőbb hordozóját, az időjárási frontot, új, színesebb arculatot adva ezzel a szinoptikának.

Időjárási front ott alakul ki, ahol az áramló levegőben, fizikai tulajdonságaikban – elsősorban hőmérsékletében – egymástól jelentősen eltérő levegőtömegek kerülnek igen közel egymáshoz. Az időjárási frontok a ciklonok, főként a fiatal ciklonok jellegzetes „tartozékai”. A ciklon keletkezésének időszakában ugyanis az örvényben a hideg és a meleg levegő jól elkülönül egymástól, közel fele-fele arányban. Abban a keskeny zónában, ahol a hideg és a meleg levegő érintkezve keveredik, alakul ki az időjárási front. Ez

**12982 11956 83304 10059**  
**20058 30081 40183 52019**  
**69932 76162 8457/**

A fenti, Szegedre vonatkozó távirat jelentése dióhéjban: Borult, esős idő, 6 km-es látástávolsággal, 4 m/s-os északnyugati szél fúj. A hőmérséklet 5,9 °C. A tengerszintre átszámított légnyomás 1018 hPa, gyengén emelkedik

A SYNOP távirat



Bjerknes, Vilhelm, az apa (1862–1951)



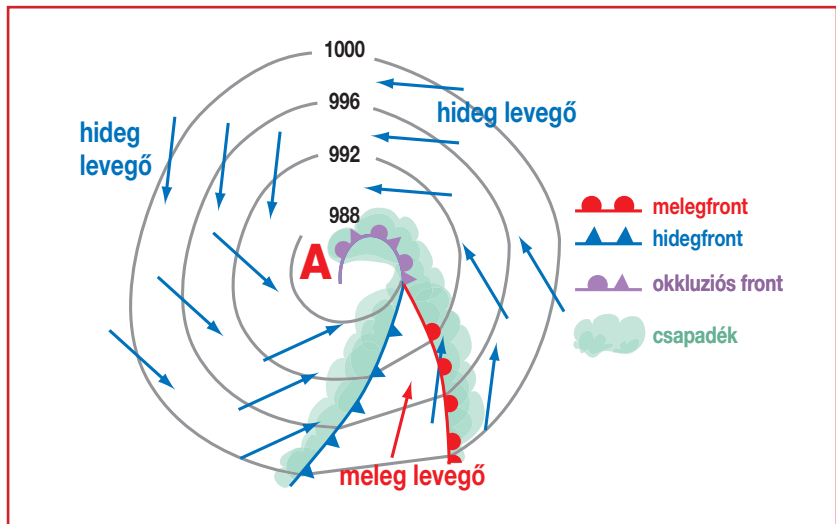
Okkludált mérsékelt övi ciklon  
a frontokkal

#### Rádiószonda:

hidrogénnel töltött nagyméretű ballonokkal 25–35 km magasra emelkedve folyamatosan méréseket végző, meteorológiai műszeregyüttes (hőmérséklet-, légnyomás- és nedvességmérő). A mérések kiértékelését ma már a mérés egy időben, automatikusan számítógép végzi. Egy – a radarelvén működő – berendezés pedig követve a ballon pályáját folyamatosan kiszámolja a magassági szél irányát és sebességét.



Vihar előtt, Toledo látképe.  
El Greco festménye, részlet, 1597



a keskeny érintkezési zóna itt az északi féltekén az óramutató járásával elmentés irányban, a ciklonnal együtt forog. Kékkel és a haladás irányában kis háromszögekkel jelöljük a frontzóna azon szakaszát, ahol ez az örvénylő mozgás a hideg levegőt a korábban meleg levegővel borított területre hajtja. Ez a *hidegfront*. S fordítva, ahol a meleg levegő hódít teret a hideg rovására, az a *melegfronti* szakasz, amelyet térképeinken pirossal és a haladás irányában kis félkörökkel jelölünk.

A ciklon örvénylése során a hideg levegő gyorsabban mozog, ezért először a középpont közelében, majd távolabb is utoléri a melegfrontot, azaz a két front „záródik”. Ezt a záródott frontszakaszt nevezi a szakma *okklúziós front*nak, amelynek mentén akár hidegfront, akár melegfront jellegű időjárási folyamatok előfordulhatnak. A térképeken lila színnel, egymást váltva a haladás irányában kis háromszögekkel és félkörökkel jelöljük. A frontok okklúziója, záródása során a hideg levegő egyre nagyobb területet foglal el a ciklonból, közben a hőmérséklet-különbség, a mozgások, áramlások tulajdonképpen hajtóereje a ciklonon belül egyre gyengül, elmosódik; mi, meteorológusok úgy mondjuk, a ciklon előrepszik. A térképen ez elsősorban a ciklonban tapasztalható hőmérséklet-különbségek gyengülésében jelentkezik. Ezzel együtt a frontok aktivitása is mérséklődik, megindul a front feloszlásának, a *frontolízis*nek a folyamata. A végső szakaszban a teljes frontálzóna okkludálódik, sőt a front fel is oszlik, s ez – hacsak a ciklon nem kap kívülről egy újabb hideg, esetleg meleg beáramlást, ami a hőmérséklet-különbséget újraéleszti – a ciklon kimúlását jelenti.

Magyarországon a frontológia az 1930-as évek közepén vonult be az időjárás-előrejelzés napi gyakorlatába Aujezsky László tevékenysége révén.

## A magaslégköri mérések rendszeressé válása

A második világháború befejezését követően, főként az 1950-es években az előrejelzések területe látványosan fejlődött. Magaslégköri mérések kísérleti jelleggel (sárkányokkal, ballonokkal, repülőgépekkel magasba juttatott műszerekkel) már korábban is folytak, de ekkor rendszeressé váltak a ha-

talmas ballonok segítségével 20–30 kilométer magasba emelt és rádióval összekötött meteorológiai műszerekkel történő **rádiószondázások**. Az időjárás-előrejelzés szakmai alapja továbbra is a szinoptikus talajtérkép (a légnyomás-szinoptika és a frontológia) maradt, de az 1950-es évek végére ez az eszköztár a napi gyakorlatban is kiegészült a magaslégköri térképekkel, azaz kialakult az *aerológiai szinoptika*.

A légkör a meteorológusok számára most már nemcsak a kísérleti munkában, hanem a napi operatív gyakorlatban is kétdimenziósról háromdimenziósra bővült. Időjárás-előrejelzést ugyan e fejlettebb eszközökkel is csak egy-két napra lehetett készíteni, de az előrejelzések minősége jelentősen javult.

## A mezoszínoptika kialakulása

Az intenzív megfigyelőrendszerek – azaz a távérzékelő műszerek, berendezések, az időjárási radar, az automata megfigyelőállomás, a tengeri bója és a műhold-meteorológia eredményei, valamint a kistérségű, gyors és veszélyes időjárási folyamatok fizikájának mind jobb megismerése – kialakított egy új tudományos szakterületet, a *mezoszínoptikát*. A mezoszínoptikai ismeretek alkalmazásával az ultrarövidtávú (néhány órás) előrejelzések és az időjárási veszélyjelzések minősége jelentősen javult, az ezekre alapuló szolgáltatások megbízhatóvá váltak. A mezoszínoptikai kutatások szülőföldje az Egyesült Államok volt (tornádókutatás), de az akkor már több mint húsz éve működő **balatoni viharjelzés** megbízhatóságának növelése érdekében egy lelkes kutatócsapat átvette a kutatások eredményeit és a magyar viszonyokra is alkalmazta.



*Rádiószonda felbocsátása az Antarktiszon*

*Tornádó*







### Balatoni vihar-előrejelzés:

a mezoszínoptika eszközeit használó időjárás-előrejelző szolgálat. Hille Alfréd repülő ezredes, meteorológus szervezte meg 1934-ben. Azóta egyetlen megszakítással (1945–1950) működik, május 1-jétől, szeptember 30-ig. Feladata: a tavon és a tó közvetlen környezetében tartózkodók időben történő figyelmeztetése a Dunántúlon gyakori, hirtelen kitörő szélviharok veszélyére.

### WMO (World Meteorological Organization):

az IMO utódaként 1950-ben megalakult, az ENSZ szakosított intézményeként működő szakmai szervezet. Székhelye: Genf.

### WWW (World Weather Watch):

Világméretű Időjárás-megfigyelő Rendszer, amelynek működését a Meteorológiai Világszervezet koordinálja.

## A meteorológiai előrejelzések főbb felhasználási területei

### 1. Időjárási veszélyjelzések (riasztások, ultrarövidtávú előrejelzések):

- ) a lakosság tájékoztatásához (média);
- ) az eszközök, berendezések, technológiák védelméhez;
- ) az időjárás okozta károk, akadályok megelőzéséhez, csökkentéséhez, elhárításához;
- ) a balesetek megelőzéséhez, egészségvédelemhez (orvosmeteorológia).

### 2. Rövid és középtávú előrejelzések

- ) a lakosság tájékoztatásához (média);
- ) a közlekedéshez és szállításhoz;
- ) a szabadidős szolgáltatások szervezéséhez;
- ) az energiagazdálkodáshoz;
- ) a munkaszervezéshez (ipar, mezőgazdaság, szolgáltatások stb.);
- ) a tervezéshez;
- ) a munkavédelemhez;
- ) a környezetvédelemhez.

A tudomány fejlődése és a felhasználói kör változásai a felsorolt szolgáltatásokon kívül újabb és újabb igényeket teremtenek.

## Nemzetközi szervezetek

A meteorológia – és ezen belül az időjárás-előrejelzések – fejlődésének igen fontos állomása és továbbfejlődésének feltétele volt a 20. század derekán megalakult **Meteorológiai Világszervezet, a WMO**, amely megteremtette az egységesen működő, világméretű időjárás-megfigyelő hálózatot (**World Weather Watch, WWW**), valamint a nemzetközi meteorológiai adatcserét még a hidegháború legkeményebb éveiben is zavartalanul bonyolító világméretű meteorológiai távközlési rendszert (Global Telecommunication System, GTS).

## Az időjárás matematikai modellezésének kialakulása

### A kezdeti lépések

A meteorológiában is sikerrel kecsegtető matematikai modellezés a már említett idősebb Bjerknes ötlete volt (1904). Elképzelése szerint az időjárás-előrejelzés elméletét a Newton-féle mozgásegyenlet, illetve az anyag- és az energiamegmaradás törvényének légköri alkalmazására kell alapozni, kiegészítve ezeket az ideális gázok állapotegyenletével. Ezen egyenletek

### A hidro-termodinamikai egyenletrendszer:

- a Newton-féle mozgásegyenletek,
- az energiamegmaradás törvénye,
- a tömegmegmaradás törvénye,
- az ideális gázok állapotegyenlete.

rendszerét nevezzük a légkör **hidro-termodinamikai egyenletrendszeré-** nek, amely egy parciális differenciálegyenlet-rendszer. A légköri folyamatokat leíró rendszer determinisztikus, azaz megfelelő kezdeti és határfeltételek (alsó és felső, illetve szükség szerint oldalsó) megadása esetén az egyenletrendszer megoldása révén meghatározhatjuk a rendszer jövőbeli állapotát (azaz ún. vegyes feladatot kell elvégeznünk). Az egyenletrendszer bonyolultsága miatt a megoldást nem lehet expliciten felírni, így a számításokhoz mindenképpen numerikus módszereket kell alkalmazni. Az egyenletrendszer számításokra alkalmas, térben és időben diszkretizált formáját Levis Fry Richardson alkotta meg az 1910-es évek elején. Richardson megpróbált az egyenletrendszer megoldásával 24 órás előrejelzést készíteni Európa térségére, kísérlete azonban a heroikus erőfeszítések ellenére – több tízezer szorzást és összeadást kellett manuálisan elvégeznie – kudarcot vallott. Ennek egyik legfőbb oka az volt, hogy a számításokhoz használt kiindulási feltételek nem álltak összhangban a légkörben uralkodó egyensúlyi viszonyokkal. A kudarc másik oka a nem megfelelő számítási eljárások használata volt: ezeknek az eljárásoknak ekkor még nem ismert sajátosságai miatt az elemi számítások tökéletes elvégzése is irreális eredményre vezetett volna.

Richardson tapasztalatait csak 1922-ben tette közzé könyv formájában. Meg volt győződve arról, hogy a kudarc oka csakis mérési hiba lehet. Olyannyira biztos volt ebben, hogy kidolgozta egy „időjárás-előrejelző nagyüzem” tervét. Elképzelése terv maradt csupán, és álmára, az időjárás modellezésének sikerére is évtizedeket kellett még várni. A modellezésre irányuló gyakorlati kísérletek az 1940-es évek közepéig elcsendesedtek.



*Richardson, Levis Fry  
(1881–1953)*

#### „Időjárás-előrejelző nagyüzem”:

Richardson elképzelése szerint a „nagyüzem” így működött volna: hatvannégyezer segéderő foglal helyet egy sportstadion-szerűen kiképzett épület lelátóján (ennyi ember közreműködésére van szükség a számításokhoz, hogy azok gyorsabbak legyenek az időjárás folyamatánál). A munkát koordináló fő-meteorológus a stadion közép-pontjából küldöncökkel hordatja szét utasításait a résztvevőkhöz, a küldöncök egyben összegyűjtötték volna a részszámításokat is. Richardson tervezett egy kísérletezésre alkalmas üzemcsarnokot is: az egész hatalmas létesítményt tavacsákak, parkok, sportpályák övezték, hogy az előrejelzés fontos műveletét végzők időnként felüldülhessenek.

*A „nagyüzem”*

## Az első eredmények

Az 1920–1930-as években egy sor elméleti tudományos eredmény született mind a matematika és a fizika, mind pedig a meteorológia területén. Kidolgozták a hidro-termodinamikai egyenletrendszer légköri modellezésre alkalmas közelítéseit, és megalkották a számítások stabilitását biztosító numerikus sémákat is.

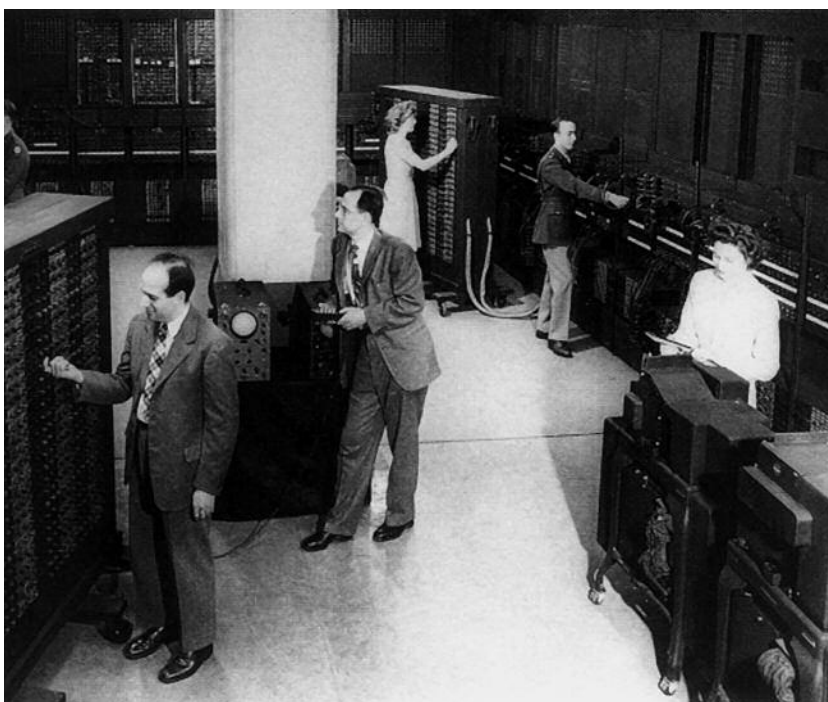
Megszülettek tehát a reményt keltő elméleti alapok. És a világ egyik első elektromos számítógépe, az Egyesült Államokban kifejlesztett ENIAC pedig eszközt teremtett ahhoz, hogy az addig hónapokat igénylő számításokat napok, esetleg órák alatt elvégezzék. Neumann János – a magyar származású amerikai kutató, aki minden idők legfiatalabb professzora volt az Egyesült Államokban – azt javasolta, hogy az addig kizárólag katonai célokat szolgáló ENIAC-ot polgári tudományos, ezen belül meteorológiai célokra is hasznosítsák.

Neumann vezetésével 1946 augusztusától húsz meteorológus dolgozott a légköri modellfejlesztéseken, s végül 1950 márciusában gépidőt is kaptak. Modelljük segítségével az 5500 méter magasban elhelyezkedő légréteg áramlási viszonyait igyekeztek 24 órával előre jelezni. A számításokat az Egyesült Államokat lefedő 235 rácspontra végezték el, az adatokat és a programkódot egymillió lyukkártyán tárolták. A kísérlet az üzemzavarok, a gyakori leállások miatt öt hétig tartott, de a tiszta számítási idő épp 24 óra lett.

E sikeres kísérlet azt jelezte, hogy a választott út járható, eredményei hozzájárultak a modellezés alapját képező egyenletrendszer tökéletesítéséhez, és ahhoz, hogy a tudósok rájöjjenek: a számszerű előrejelzést a rácshálózat sűrítésével lehet pontosítani.



Neumann János és az ENIAC





# Az időjárás számszerű előrejelzése napjainkban

## A számszerű időjárás-előrejelzés előkészítő lépései

A számszerű időjárás-előrejelzés alapja és kiindulópontja az időjárás tényleges, ún. „pillanatnyi” állapota a számítás kezdetének időpontjában. Ez a gyakorlatban a modell prognosztikai változóinak a modell háromdimenziós rácsán történő előállítását tételezi fel. Hogy ennek a kiinduló helyzetnek a leírása minél pontosabb legyen, a WMO megszervezte az egységes globális időjárás-megfigyelő rendszert, amelynek legfontosabb adatforrásai a következők:

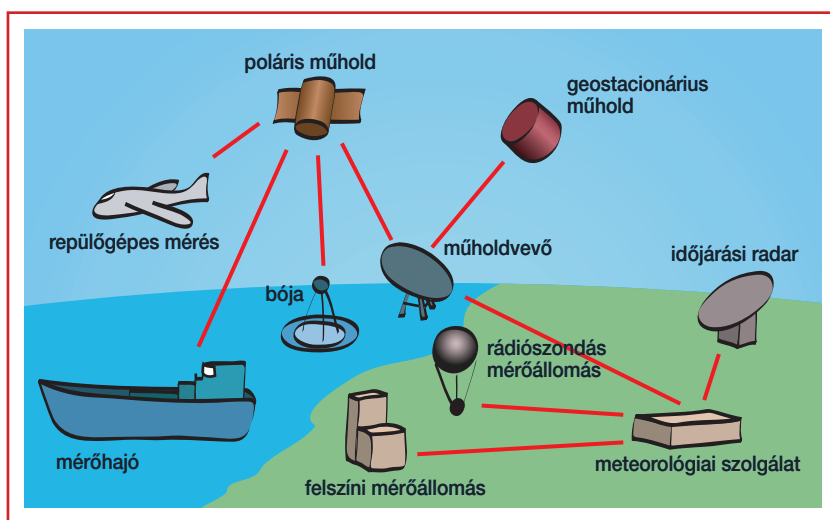
- › kb. 5000 föld- vagy tengerfelszíni állomáson, bójákon emberek vagy automaták mérik óránként vagy folyamatosan a légnyomást, a levegő hőmérsékletét és nedvességtartalmát, a szél irányát és sebességét;
- › kb. 1000 helyen naponta kétszer ballonok segítségével 20–30 km magasba emelkedő rádiószonda méri ugyanezeket a paramétereket a légkör magasabb rétegeiben;
- › az orbitális (a sarkokat érintve a Föld körül keringő) és a geostacioner (az Egyenlítő fölött, a Földhöz viszonyítva állandó helyen, a Földdel együtt forgó) meteorológiai mesterséges holdak a világűrből szondázzák a légkört;
- › a közforgalmi repülőgépek és a kereskedelmi hajók fedélzetén automaták és emberek végeznek meteorológiai megfigyeléseket és méréseket;
- › az időjárási radarok is adatokat szolgáltatnak.

Ez a több gigabájtnyi információ a WMO Globális Távközlési Rendszerén, a GTS-en keresztül jut el a számítógépes időjárás-előrejelző központokba.

A számszerű időjárás-előrejelzés következő mozzanata a **kezdeti feltételek** meghatározása, vagyis annak az időjárási alaphelyzetnek a lehető legpontosabb, számszerű megadása, amely a légkörre a modell indításának pil-

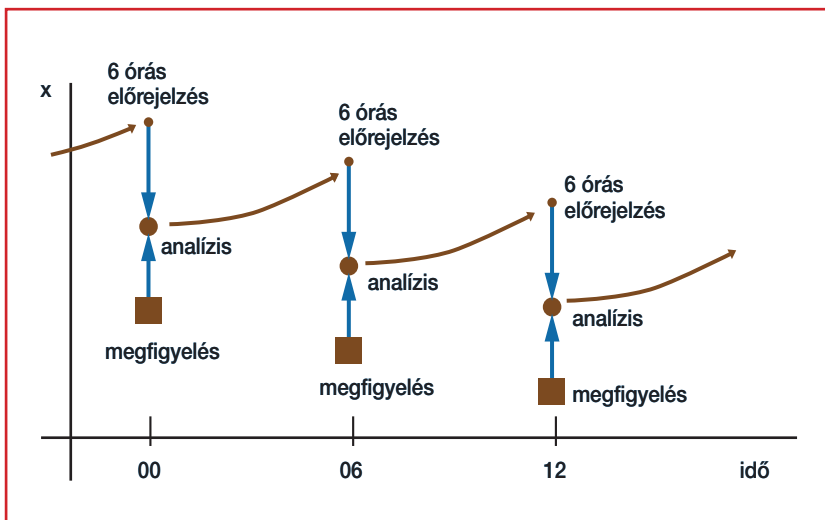
### Kezdeti (kiindulási) feltételek:

az időjárás matematikai modellekkel történő előrejelzésénél, a számítások kezdeti időpontjában, a számítások kiinduló alapját képező uralkodó időjárás pontos leírása.



A meteorológiai megfigyelő-rendszer

## Az adatasszimiláció folyamata

**Analízis:**

hagyományosan az időjárás mért és megfigyelt adatainak szinoptikus térképeken történő elemzését és ennek segítségével a pillanatnyi időjárás képi megjelenítését értjük alatta. Az időjárás matematikai modellekkel történő előrejelzésénél a megfigyelt és a számított adatok segítségével megadott kezdeti feltételeket jelenti.

lanatában a legjellemzőbb volt. Ezt a műveletet *adatasszimilációnak*, az eredményeként előálló mezőt pedig *analízisnek* nevezzük.

Ha pontatlanok a kezdeti feltételek, azaz ha nem tudjuk a légkört legjobban megközelítő állapotból indítani a modellt, még csak reményünk sem lehet a pontos előrejelzésre, még akkor sem, ha a modellünk egyébként tökéletes. A fő törekvésünk tehát: az **analízis** a lehető legközelebb álljon a légkör valódi állapotához.

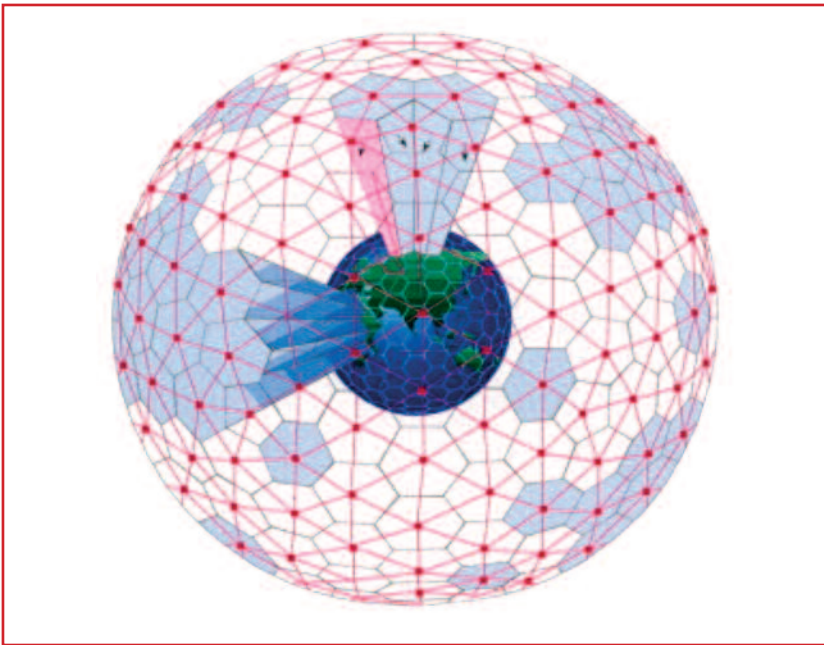
Ahhoz, hogy ezt a követelményt teljesítsük, lehetőség szerint minden rendelkezésünkre álló adatot és információt fel kell használnunk, amelyek elsősorban a fent jelzett forrásokból származó mérési adatok.

Ezeket – a mérések természeténél fogva földrajzilag rendszertelenül elhelyezkedő – adatokat a kezelhetőség érdekében mind vízszintes, mind függőleges irányban a modell szabályos rácshálózatra számítjuk át, vagyis interpoláljuk.

Mivel az óceánok és a ritkán lakott területek felett csak kevés megfigyelés áll rendelkezésre, a fenti interpolációs probléma erősen alulhatározott. Ez azt jelenti, hogy a megfigyelések önmagukban még nem elégségesek a kiindulási állapot korrekt meghatározásához, hanem ehhez más információt is fel kell használni. Ezt a többletinformációt az előrejelzési modell adott időpontra vonatkozó előrejelzése szolgáltatja. Az adatasszimiláció következő lépéseként ezért a rácspontokra interpolált megfigyelési adatokat – sajátos matematikai módszereket felhasználva – kombináljuk az előrejelzési modell korábbi időpontból futtatott és a kiindulási időpontra vonatkozó adataival. Tehát a mért és a már előrejelzett adatok kombinációjából származó új adatok képezik a modell kezdeti állapotát. Meg kell említeni, hogy az egyes információk szintézisének az adatokat megbízhatóságuk függvényében kell súlyozni az analízis-eljárás során (azaz a pontosabb, megbízhatóbb információkat nagyobb súllyal vesszük figyelembe, mint a kevésbé pontosakat), és hogy az adatasszimiláció természetesen a hibás adatok kiszűrését is magában foglalja.

## Az előrejelzés művelete

Az előkészítő lépéseket követően kerül sor a vázolt egyenletrendszer megoldására, azaz a **modell integrálására**. Az egyenleteket egy térbeli rácson, időlépcsők bevezetésével oldjuk meg, azaz az integrálás végrehajtásához térbeli és időbeli diszkretizációt kell végrehajtanunk. Az egyenletekben megjelenő dinamikai tagokat (mint például a különböző fellépő erőhatásokat) explicit módon tudjuk származtatni. Az ezek mellett megjelenő olyan kis skálájú folyamatokat, amelyeket a modell véges felbontása, illetve az adott folyamat nagyfokú bonyolultsága miatt egyébként nem tudnánk figyelembe venni, az ún. **parametrizációk** révén építjük be a modellekbe (ilyen jelenségek például a csapadékképződés mechanizmusai, a sugárzás, a konvekció, a felszíni határréteg jelenségei, a turbulencia stb.). A műveleteket valamennyi rácspontra és minden egyes időlépcsőben elvégezzük. Ez rendkívül nagy számítástechnikai feladat, amely különlegesen nagy teljesítményű és gyors számítógépet feltételez.



### Modell integrálása:

az előrejelzést lépcsőzetesen végezzük el, mindig egy időlépcsőnyi intervallummal előre jelezve a légkör állapotát a rácspontokban mindaddig, amíg el nem érkezünk a teljes előrejelzési intervallum végéig.

### Parametrizálás:

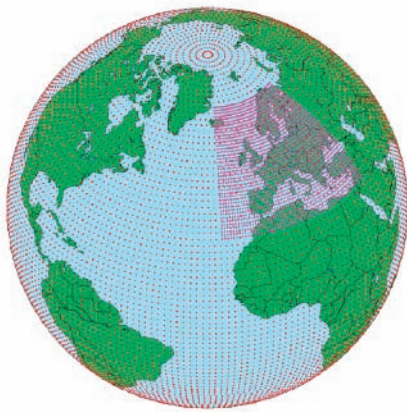
azon eljárások gyűjtőneve, amelyekkel az előrejelző modellek rácspelbontásánál kisebb léptékű, bonyolult, explicit módon nehezen leírható folyamatokat (sugárzás, csapadékképződés, turbulencia stb.) figyelembe vesszük a numerikus előrejelző modellekben.

*Időjárás-előrejelző modell globális rácshálózata*

Egy globális – teljes földgömbre vonatkoztatott – modell esetében 48 órás előrejelzésnél, ahol 50 kilométeres rácsponttávolsággal, 30 egymás fölött elhelyezkedő magassági szinttel és öt meteorológiai elem előrejelzésével dolgozunk, negyvenmillió rácsponton kell elvégezni a számítást, és ha mindezt 15 perces időlépcsővel alkalmazzuk, akkor a negyvenmilliót még meg kell szorozni az összes időlépcső számával, azaz 192-vel, a rácsponti számítások száma tehát 7680 millió.

A globális modellek megfelelő pontossággal írják le egy-egy nagyobb régió (például az észak-atlanti–európai térség) olyan nagyléptékű időjárási folyamatait, mint a frontok átvonulása és a ciklonok keletkezése, kevésbé pontosan jellemzik azonban a kisebb térségek (például a Kárpát-medence) egyes vidékeinek időjárását. Ennek elsődleges oka az ilyen mo-





Korlátos tartományú időjárás-előrejelző modell rácshálózata

#### ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting):

Angliában, Readingben működő időjárás-előrejelző központ, amelyet a nyugat-európai országok hoztak létre.

#### EUMETSAT:

a nyugat-európai országok által létrehozott, időjárási műholdakat fejlesztő, üzemeltető és ezek információit feldolgozó és szolgáltató szervezet (European's Weather Satellite Organisation), amelynek Magyarország a társult tagja. Székhelye Darmstadt.

dellek korlátozott térbeli (kb. 40–100 km) és időbeli felbontása, amely a jelenlegi számítási kapacitás mellett nem növelhető jelentősen. A gyorsan fejlődő és a domborzat által nagymértékben befolyásolt lokális időjárási jelenségek előrejelzéséhez ezért olyan modelleket használnak, amelyek jelentősen jobb (kb. 5–25 km) felbontásúak ugyan, mint a globális modellek, de nem az egész Földre, hanem csak egy kisebb földrajzi térségre, ún. korlátos tartományra (például Közép-Európára) szolgáltatnak előrejelzést.

Ilyenkor a kiválasztott terület szélein az ún. perem- – vagy oldalsó – határfeltételeket a globális modellek szolgáltatják, de még az ily módon leegyszerűsített korlátos tartományú modellek számítástechnikai igényei is túlnőhetnek a kisebb országok meteorológiai szolgálatainak lehetőségein.

Ezért e feladatok megoldására és a modellek továbbfejlesztésére a legfejlettebb számítástechnikával felszerelt előrejelző központok alakultak – eleinte a Meteorológiai Világszervezet keretein belül, az utóbbi évtizedben azonban egyre inkább nemzetközi gazdasági társulások keretében, tehát kereskedelmi alapon. Hazánk 1997 óta társult tagja az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központnak, az **ECMWF**-nek, s így felhasználója lehet a központ globális előrejelzéseinek, melyek a szakma legújabb és legfejlettebb modelljével készülnek.

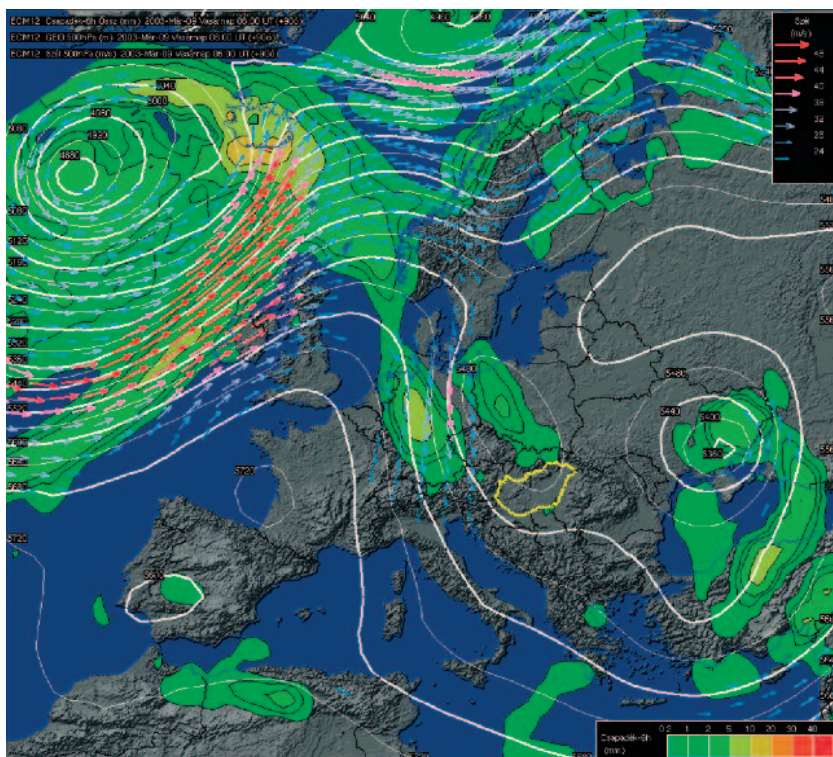
## Utófeldolgozás

A numerikus modellekkel készített előrejelzések közvetlenül csak a legfontosabb meteorológiai elemek, a hőmérséklet, a légnyomás (pontosabban valamely meghatározott légnyomási érték tengerszint feletti magassága), a nedvesség és a szél rácspontra kiszámított, jövőbeni értékeit adják meg.

Ez azonban még nem a hétköznapi értelemben vett időjárás. A rendelkez-



Munkában az előrejelző meteorológus



A légnyomás-, a szél- és a csapadék-előrejelzés megjelenítése térképen

zésre álló eredményeket csak az utófeldolgozás során lehet széleskörűen értelmezni. Az utófeldolgozás során az előrejelzéseket a modell számítási rácsáról az igényelt földrajzi pontokra interpolálják, és statisztikai és fizikai összefüggésekre épülő módszerek segítségével számítanak ki olyan alapvető időjárási jellemzőket, mint a csapadék halmazállapota és intenzitása, a köd, a napi maximum és minimum hőmérséklet stb.

Az utófeldolgozáshoz tartozik az előrejelzések térképes megjelenítése is. Az előrejelzést készítő szakember előtt térképeken követhető formában jelenik meg az időjárás alakításában döntő szerepet játszó meteorológiai paraméterek jövőbeni földrajzi eloszlása, változása.

Ha a meteorológus kiegészíti ezeket légkörfizikai, klimatológiai ismereteivel, tapasztalataival, már megfogalmazhatja egy meghatározott térség várható időjárását: a prognózist. Felmerül a kérdés, hogy a jelentős mértékű **automatizáltság** mellett milyen mértékű emberi beavatkozásra van szükség ebben a folyamatban. Nos, bár a modellek rendkívül sokat fejlődtek az utóbbi időben, az előrejelző szakemberek speciális tudása még mindig jelentősen javíthatja az előrejelzések bevalását.

Az előrejelzések javítása bizonyos fokig automatizáltan is történhet. Erre a célra olyan tanuló algoritmusokat használnak, amelyek egy megadott földrajzi pontra vonatkozó megfigyelések és előrejelzések közötti statisztikai összefüggések alapján automatikusan végzik el a megfelelő korrekciót. Ezekkel a módszerekkel lehetséges a modellek bizonyos területeken fellépő szisztematikus hibáinak a javítása: például ha a modell egy adott helyre rendszeresen a valódinál magasabb hőmérsékletet jelez előre, akkor a fenti eljárás pár napos „tanulási idő” után a megfelelő irányba fogja korrigálni az előrejelzett értékeket.

#### Automatizáltság:

a számítástechnika fejlődésének köszönhetően ma már a prognózisok készítése is nagyrészt automatikusan zajlik. Tekintve, hogy számos földrajzi helyre és térségre többféle formában és rengeteg különböző felhasználónak kell előrejelzést készíteni, ez nem is meglepő.



# Új fejlesztési irányzatok az időjárás-előrejelzések objektív módszerében

## A számszerű időjárás-előrejelzés korlátai:

- lehetetlen pontosan leírni a modell alapját képező időjárás kiinduló állapotát,
- a modellek nagyfokú érzékenységet mutatnak a kezdeti felvételekre, nagyon kis hibák is nagy előrejelzési hibákhoz vezethetnek,
- a számítástechnikai lehetőségek korlátozottak, és ez megalkuvásokra kényszerít,
- a térben és időben diszkrétizált modellek csupán közelítő leírását tudják adni a légkörben mint folytonos közegben lezajló folyamatoknak,
- az alkalmazott egyenletrendszer bonyolult.

A tökéletes időjárás-előrejelzés elérését korlátozó tényezők ismerete egyben kijelöli a fejlesztés mai és lehetséges jövőbeni irányait is. Az előadásban több ízben hangsúlyoztuk, hogy az előrejelzési modellek számára leírt kiinduló időjárás, azaz a kezdeti feltételek meghatározása soha sem lehet tökéletes. A meghatározás hibái és a hibák gyors növekedése az idővel lehetetlenné teszik a százszázalékos előrejelzés készítését. Ezért a „becsületes” eljárást az előrejelzések valószínűségi formában való megfogalmazása jelentheti.

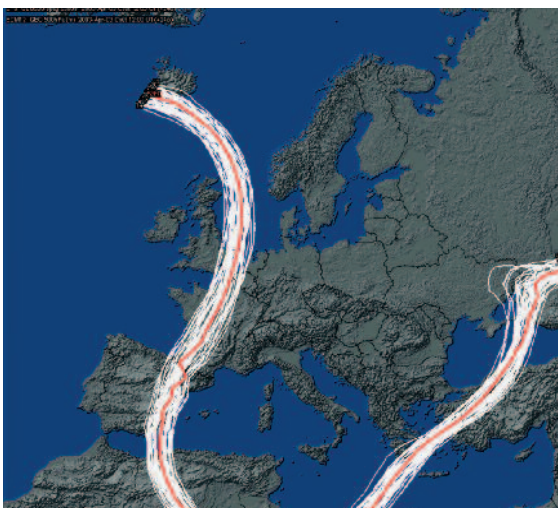
## Az ensemble-előrejelzés

A meteorológusok korábban is törekedtek a valószínűségi előrejelzések készítésére, de módszereik többnyire szubjektívek voltak. Az elmúlt öt-tíz esztendő egyik jelentős eredménye egy objektív alapon, az előrejelzések matematikai modellezésén nyugvó valószínűségi előrejelző módszer, az **ensemble-**, vagyis az **együttes-előrejelzések** kidolgozása és bevezetése a napi gyakorlatba.

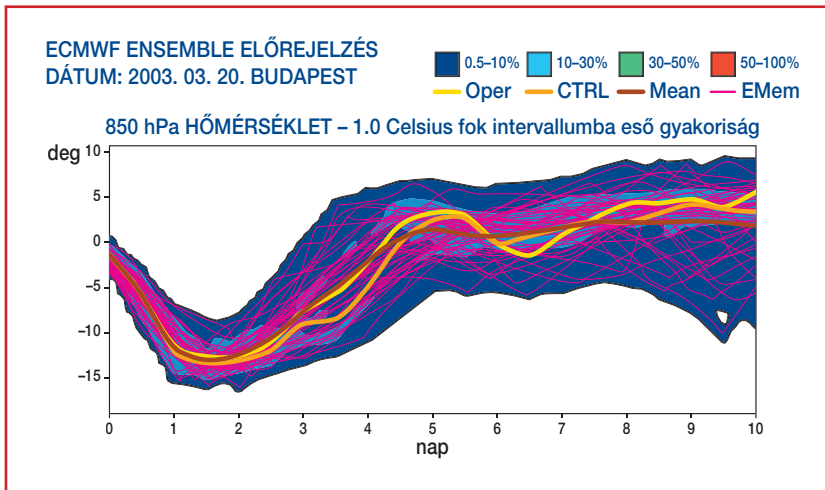
Az együttes-előrejelzések lényege az, hogy a determinisztikus előrejelző modell egyenletek megoldását a szokásos, a kiinduló állapotként rendelkezésre álló mérési adatokat felhasználó futtatáson (kontroll-futtatás) kívül más és más kiinduló állapotból többször elvégzik. Az új kiinduló állapotokat az eredeti futtatás kiinduló adatainak hibahatáron belüli megváltoztatásával nyerik oly módon, hogy az előrejelzett állapotok a légkör minden lehetséges lényegesen különböző jövőbeli állapotát lefedjék.

Mivel az együttes-előrejelzés tagjai egyformán lehetséges prognózisokat szolgáltatnak, ezen előrejelzésekből valószínűségi információ származtat-

*Spagetti-diagram egynapos megfigyelési adatokkal (balra) és hatnapos adatokkal (jobbra)*



ható. Az adott időjárási helyzet valószínűségi értékeit a prognosztizált eredmények együttesének szórása adja, a nagyobb szórás nagyobb bizonytalanságra utal. Fontos hangsúlyozni, hogy ez a bizonytalanság nem pusztán a modell hibájából fakad, hanem a légkör belső tulajdonsága, amely időről időre és területről területre változik, azaz mindig az aktuális áramlási kép függvénye.



Fáklya-diagram

A bizonytalanság grafikus jellemzésének jól bevált eszköze az ún. *fáklya-* és *spagetti-diagram*. A fáklya-diagramon egy előrejelzett változó megadott földrajzi helyre vonatkozó értékének időbeli változását jelenítjük meg az együttes összes tagját felhasználva. Minél vastagabb a fáklya egy adott időpontban, annál bizonytalanabb az erre az időpontra vonatkozó prognózis. A spagetti-diagram lényege az, hogy egy adott prognosztizált változó esetén kiválasztunk egy konkrét szintvonalértéket, és ezt a vonalat az együttes minden egyes tagjára ugyanazon a térképen ábrázoljuk. Ahol és amikor ezek a vonalak együtt futnak, az előrejelzés bizonytalansága kicsi, ellenkező esetben viszont egymástól lényegesen különböző légköri állapotok előfordulása is egyformán valószínű, azaz a bizonytalanság nagy.

## Célzott megfigyelések

Földünkön szinte mindig található olyan térség (**érzékenységi terület**), ahol egy adott időponthoz tartozó kiinduló állapot – azaz a kezdeti feltételek minél pontosabb ismerete – döntő lehet egy másik, távoli (ún. **kiértékelési terület**) későbbi időpontra vonatkozó időjárás-előrejelzésének pontosságában. Ez az állítás azonban meg is fordítható. Ha egy középtávú előrejelzés a Föld egy kiértékelési területére, mondjuk, viharos időjárást jelez, található a Földön olyan másik terület, ahol – ha pontosítjuk a kiindulási feltételeket – nagyobb biztonsággal és pontosabb részletekkel jelezhetjük előre a várt kritikus időjárást.

Ez a felismerés arra a következtetésre vezette a tudósokat, hogy érdemes rugalmasan, célzottan kezelni a kezdeti feltételek pontosítását szolgáló mé-

### Ensemble-előrejelzés

#### (együttes-előrejelzés):

az előrejelző modell egyenleteit – az eredeti futtatáson kívül – a kezdeti feltételek kisebb megváltoztatásával többször is lefuttatják. A végső, valószínűséggel kifejezhető eredményt a kapott eredmények együttesének szórása adja.

#### Érzékenységi terület:

az a hely, ahol egy bekövetkezett időjárási (kiinduló) állapot befolyással van egy távoli – meghatározott helyen és időben várható – időjárás alakulására.

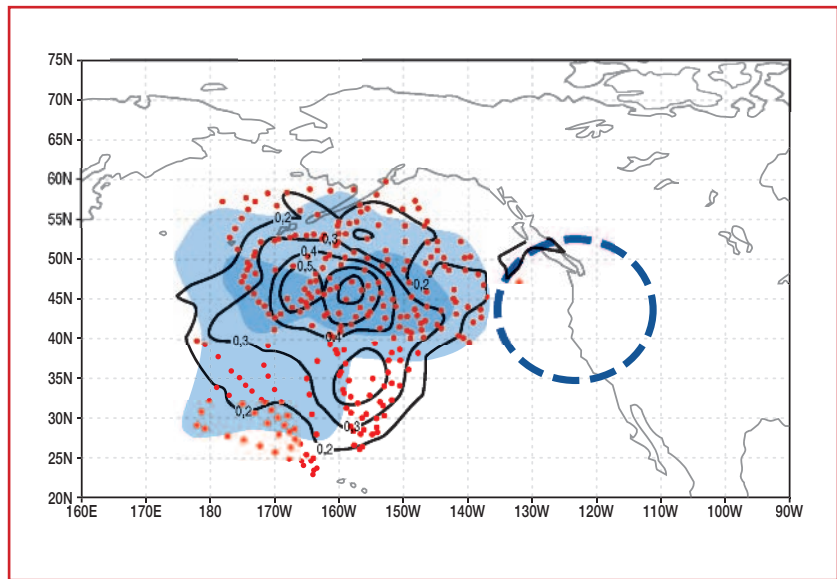
#### Kiértékelési terület:

az a hely, ahol egy meghatározott távoli területen (az érzékenységi területen) korábban bekövetkezett időjárási állapot befolyásolja a várható időjárást.

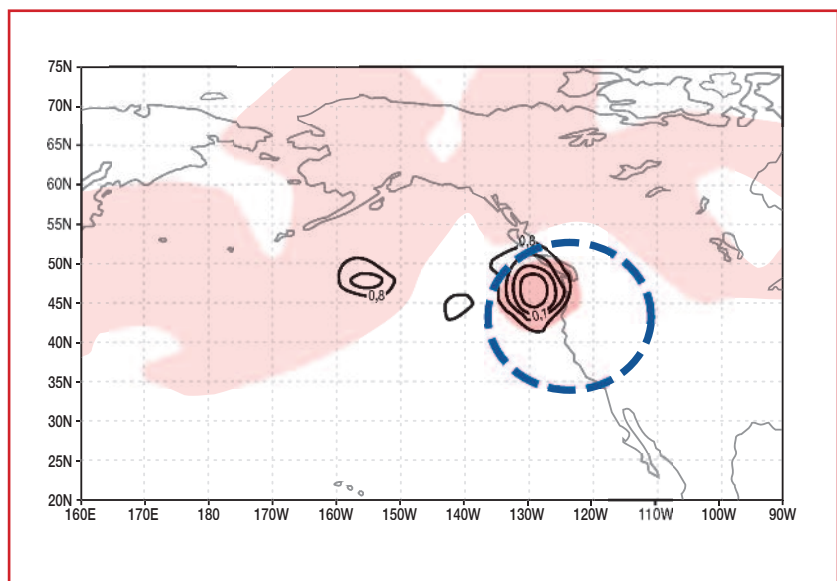




*Érzékenységi terület:  
az NCEP (National Centers for  
Environmental Prediction, USA)  
modelljével elvégzett kísérletek  
átlagos eredménye. A kékre színe-  
zett zóna az átlagos érzékenységi  
területet mutatja, amelyen belül  
a piros pontok a járulékos megfi-  
gyeléseket jelölik, a fekete vonalak  
pedig az ezek hatására a kezdeti  
feltételekben jelentkező átlagos  
eltérést adják meg a légnyomásra  
vonatkozóan.*



*Kiértékelési terület:  
a járulékos megfigyelések átlagos  
hatása a 36 órás előrejelzésre.  
A színezés azt a területet jelöli,  
ahol a módosított kezdeti felvéte-  
lekből futtatott 36 órás légnyomás-  
előrejelzés eltér az eredeti előre-  
jelzéstől. A legnagyobb eltérés  
éppen a kiértékelési területen  
belül figyelhető meg.*



### Rutinmegfigyelések járulé- kos kiegészítései:

a járulékos megfigyelések tör-  
ténhetnek repülőgépről indít-  
tott, ejtőernyővel ellátott rá-  
diószondákkal; pilóta nélküli,  
programozott pályán haladó  
repülőgépekkel; az érzékenysé-  
gi területen mozgó hajókra  
vagy szárazföldi járművekre  
szerelt mobil rádiószondázó  
berendezésekkel; műholdakra  
telepített, parancsra működő  
távérzékelő műszerekkel stb.

rések és megfigyelések rendkívül költséges sűrítését és az ugyancsak költsé-  
ges számítástechnikai háttér maximális kihasználását. A kiindulási feltéte-  
lek pontosításának módjai tehát:

- ) a rendszeresen végzett rutinmérések szükség és lehetőség szerinti *sűríté-  
se*;
- ) a **rutinmegfigyelések járulékos kiegészítése** *célzott megfigyelésekkel*  
az érzékenységi területen belüli.

A célzott megfigyelések helyének kijelölése objektív, matematikailag és fi-  
zikailag megalapozott módon történik, és az érzékenységi terület meghatá-  
rozásához magát az időjárás-előrejelző modellt, pontosabban annak egy spe-  
ciális konfigurációját használják. Az elmúlt évek során érzékenységi terület-  
ként elsősorban a Csendes- és az Atlanti-óceán északi térsége szerepelt, mert  
az itt gyakran kialakuló heves ciklonok döntően befolyásolják Észak-Ame-  
rika és Európa napokkal később várható, markáns időjárási eseményeit.

## A jövő

Az időjárás-előrejelzések, ezen belül az ensemble-prognosztika sikere az elmúlt évtizedben vitathatatlan (kiváltképp a középtávú előrejelzésekben), és a továbbfejlődésben egyre jelentősebb szerep jut a megfigyelőrendszer mobilizálásából származó lehetőségeknek. Egyre több szakember látja a továbbfejlődés lehetőségét abban, hogy a jövőben a hagyományos, eddig meglehetősen merev világméretű megfigyelőrendszert kiegészíti egy rugalmas, mobil, a Föld bármely érzékenységi területén bevethető megfigyelőrendszer, amely tökéletesíti az előrejelző modellek kiinduló feltételeit, és ezen keresztül az időjárás-előrejelzéseket. A számítások kezdeti feltételének pontosítása, a minél pontosabb és az új megfigyelések felhasználása várhatóan kulcsfontosságú lesz a fejlődésben.

A másik sokat ígérő fejlődési irány az előrejelző modellek továbbfejlesztéséhez kapcsolódik. A legtöbb ma használt modellben (a globális modellekben kivétel nélkül) az ún. **hidrosztatikus** közelítést alkalmazzák, ami azt jelenti, hogy elhanyagolják a függőleges gyorsulásokat. Ez a közelítés a kis skálájú, heves meteorológiai folyamatok (például zivatarok) leírásánál már megengedhetetlen (kb. 5–2 km az a legkisebb horizontális rácsfelbontás, amely mellett a hidrosztatikus közelítés még használható). Ahogy a modellek horizontális felbontása egyre finomodik, a jövőben várhatóan egyre több operatív előrejelző központ fog áttérni az olyan ún. nem-hidrosztatikus előrejelző modellekre, amelyekben a vertikális gyorsulások már megengedettek. Ez mind tudományos, mind számítástechnikai szempontból komoly kihívást jelent, de a helyi időjárási jelenségek pontosabb előrejelzéséhez ezt a lépést meg kell tenni.

A befektetés megtérül. A modern meteorológiai eszközökkel a meteorológusok most tíz nap távlatában látják előre az időjárás alakulását olyan biztonsággal, mint azt 1990-ben öt napra tehatték. Logikus lenne, ha 2010-ben talán épp kollégám, Kertész Sándor – aki nélkülözhetetlen segítőtársam volt ennek az előadásnak az összeállításában, itt a Mindentudás Egyetemén – jelentené: „... ma már húsz napra vagyunk olyan sikeresek, mint 2003-ban tíz napra voltunk.” A fejlődés azonban az utóbbi tíz év során lelassult.

Az előrejelzés időtartamában – az eddigi módszerek használatával elért – nagy ugrások lehetőségeit ugyanis jórészt kimerítettük. A fejlődést a jövőben elsősorban az objektív módszerekkel alátámasztott valószínűségi prognózisok továbbfejlesztésétől, valamint – elsősorban a kisebb földrajzi régiók minél részletesebb előrejelzéseiben – a nem-hidrosztatikus modellek alkalmazásától reméljük.

### Hidrosztatikus előrejelző modell:

olyan számszerű időjárás-előrejelző modell, amelyben a függőleges gyorsulásokat elhanyagolják. Ez a közelítés elsősorban a nagytérségű folyamatok (ciklonok) leírására alkalmas, de a kisebb skálákon is jól működik egészen addig, amíg a horizontális ráctávolság nagyobb, mint 5–2 km.



## Ajánlott irodalom

*Burroughs, W. J. – Crowder, B. – Robertson, T. – Vallier-Talbot, E. – Whitaker, R.*: Weather. London: Harper Collins Publishers, 1996.

*Czelnai Rudolf*: Bevezetés a meteorológiába. I–III. Bp.: Tankönyvkiadó, 1993–1996.

*Daley, Roger*: Atmospheric Data Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

*Götz Gusztáv*: Káosz és prognosztika. Bp.: Országos Meteorológiai Szolgálat, 2001.

*Götz Gusztáv – Rákóczi Ferenc*: A dinamikus meteorológia alapjai. Bp.: Tankönyvkiadó, 1981.

Időjárás és előrejelzés. *Természet Világa*, 129. (1998) I. különszám.

*Kurz, Manfred*: Szinoptikus meteorológia. A Magyar Meteorológiai Szolgálat továbbképzési anyaga. Bp.: OMSZ, 1986.

*Makainé Császár Margit – Tóth Pál*: Szinoptikus meteorológia. I–II. Bp.: Tankönyvkiadó, 1978.

Numerikus prognosztika. I. *Práger Tamás*: A hidrodinamikai előrejelzés elmélete. Bp.: Tankönyvkiadó, 1982.

*Roth, Günter D.*: Meteorológiáról mindenkinek. Bp.: Magyar Könyvklub, 2000.

*Williams, Jack*: The Weather Book. New York: Vintage Books, 1997.